

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.023

复合绝缘子护套与芯棒界面粘接性及界面质量检测方法研究

段明明¹, 王 隽¹, 屠幼萍¹, 张福增², 李锐海²

(1. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

摘要: 为有效评价复合绝缘子护套与芯棒的界面质量,文中首先提出了一种护套—芯棒压剪试验方法,通过检测护套与芯棒的界面粘接强度对界面粘接性进行评判。对 3 支运行复合绝缘子不同位置的试样分别进行护套—芯棒压剪试验和解剖试验,结果表明护套—芯棒压剪试验可以有效检测护套与芯棒界面的粘接性。进一步研究护套与芯棒界面质量的检测方法,对水煮后的带护套芯棒试样先后进行改进的水扩散试验和护套—芯棒压剪试验,结果表明界面泄漏电流值和界面粘接强度,可以分别反映护套与芯棒界面的缺陷和粘接性。研究说明结合改进的水扩散试验方法与护套—芯棒压剪试验方法可以对护套与芯棒的界面质量进行有效检测。

关键词: 复合绝缘子; 护套与芯棒界面; 粘接性; 压剪试验; 粘接强度; 界面质量

Study of Interface Adhesion and Interface Quality Detection Between Housing and Core Rod of Composite Insulators

DUAN Mingming¹, WANG Cong¹, TU Youping¹, ZHANG Fuzeng², LI Ruihai²

(1. Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: To effectively evaluate the interfacial quality between the housing and core rod of composite insulators, a housing-core compressive shear test method is proposed in this paper. This method evaluates the interface adhesion by detecting the interface adhesive strength. Samples are taken from different positions of three composite insulators in operation for anatomy experiment and housing-core compressive shear test. The results show that the housing-core compressive shear test can effectively evaluate the interface adhesion. For further study of interface quality detection, the modified water-diffusion test and housing-core compressive shear test are conducted on the boiled insulator samples. The results show that interfacial leakage currents and interfacial adhesion strengths can respectively reflect the interfacial defects and interfacial adhesion. The combination of modified water-diffusion test method and housing-core compressive shear test method can effectively evaluate the interfacial quality between housing and core.

Key words: composite insulators; interface between the housing and core rod; adhesion performance; compressive shear test; adhesive strength; interface quality

0 引言

随着运行年限的增加以及表面放电、紫外照射等外部因素的影响,运行线路复合绝缘子发生电气损坏和机械损坏的事故日益增多^[1-4]。在复合绝缘子损坏事故中,由于护套与芯棒界面质量差引发的绝

缘子界面击穿或断裂事故频频发生^[5-7]。复合绝缘子护套与芯棒的界面是其质量控制的薄弱环节,大量研究表明,护套与芯棒之间的界面质量差是复合绝缘子发生界面击穿或芯棒断裂的重要原因,若复合绝缘子护套与芯棒的界面粘接质量差,则界面形成的气隙将使周围的电场分布发生畸变,高场强的长期作用促使绝缘子界面发生局部放电,使绝缘子性能劣化,严重时会导致绝缘子界面击穿甚至断裂的

收稿日期:2016-03-07; 修回日期:2016-05-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51477072)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477072).

发生,影响输电线路的安全运行^[8-15]。对护套与芯棒的界面质量进行研究并找出能有效评价其界面质量的检测方法对于确保电网的安全稳定运行至关重要。

复合绝缘子芯棒与护套界面的质量差是其发生界面击穿和绝缘子断裂的重要原因,然而目前相关标准中并未针对复合绝缘子护套与芯棒的界面质量给出统一的判断方法。国内现有的研究成果表明,既可以通过检测护套与芯棒的界面粘接性对界面质量进行判断,也可以通过检测护套与芯棒的界面缺陷对界面质量进行判断。南方电网科学研究院张福增提出了解剖分级试验法,通过解剖护套并根据芯棒与护套分离的难易程度,将护套与芯棒的界面粘接性分为 5 个等级^[16];华北电力科学研究院陈原依据标准 GB/T 19519—2004 中的水扩散试验方法,提出了改进的水扩散试验方法,对带护套芯棒试样和无护套芯棒试样同时进行水煮,根据水煮后两种试样的泄漏电流值判断护套与芯棒的界面缺陷^[17]。以上两种试验方法中,解剖分级法操作简单,对设备要求较低,但会受到操作者主观因素的影响;改进的水扩散试验通过判断水煮后绝缘子试样护套与芯棒的界面缺陷对绝缘子的界面质量进行评价,缺乏界面粘接性判断依据。因此,以上两种试验方法均还不足以对复合绝缘子护套与芯棒的界面质量进行全面的评价。

为有效判断复合绝缘子护套与芯棒的界面粘接性,文中提出了一种护套—芯棒压剪试验方法,并对该方法的有效性进行了验证;进一步将改进的水扩散试验方法与护套—芯棒压剪试验方法相结合对护套与芯棒界面质量的检测方法进行了研究,对护套与芯棒的界面质量进行了初步分级。

1 试验方法及试样信息

1.1 试验方法

参考《GB/T 11177—1989 无机胶粘剂套接压缩剪切强度试验方法》^[18]中对胶粘剂压缩剪切强度的测试方法,将长度为 30 mm 的带护套芯棒试样固定在强力拉力机上,对芯棒施加一个恒定速度的压力,使芯棒缓缓向下移动,直至芯棒完全脱离护套。试验将得到压剪力—压缩位移曲线,通过分析曲线进而对护套与芯棒的粘接性进行判断。护套—芯棒压剪试验模型见图 1;试验得到的压剪力—压缩位移典型曲线见图 2。

一般情况下,胶粘结构在粘接完成使用时,总是要求具有最佳的力学性能,而目前衡量胶粘体系力学性能优劣的主要指标就是粘接强度^[19]。护套—芯棒压剪试验用于检测护套与芯棒界面粘接性的原理

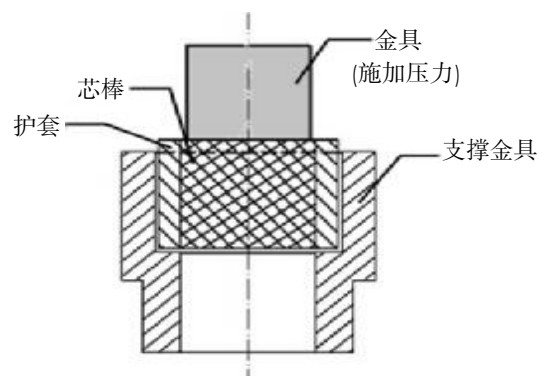


图 1 护套—芯棒压剪试验模型

Fig. 1 Model of the housing-core compressive shear test

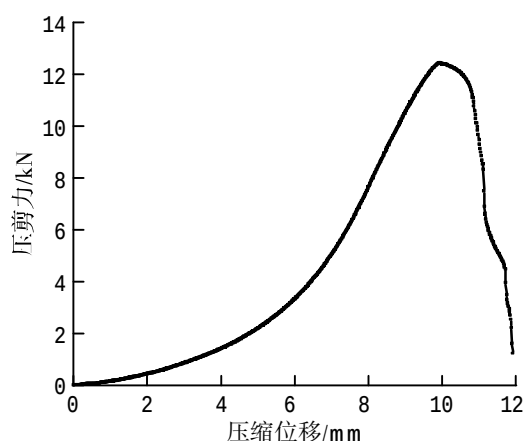


图 2 典型压剪力—压缩位移曲线

Fig. 2 Typical curve of compressive shear pressure-displacement

为:由于护套与芯棒的胶接面(界面)与芯棒、护套的公共轴线平行,且护套固定在支撑金具上,施加的压缩力通过芯棒传递至胶接面。当施加的压缩力较小时,界面粘接体系未发生明显破坏,压缩力逐渐增大,增大至最大值时芯棒与护套完全分离,试验结束。以单位胶接面积承受的最大压剪力计算压剪强度,即界面的粘接强度。界面的粘接强度越大,护套与芯棒界面的粘接性越好,反之则越差。

界面粘接强度计算公式为

$$\tau = P / (\pi d l) \quad (1)$$

式(1)中: τ 为界面粘接强度,单位为 MPa; P 为芯棒与护套分离过程中的最大压剪力,N; d 为芯棒直径,用于压剪试验的试样直径均为 24 mm; l 为试样长度,文中用于压剪试验的试样长度均为 30 mm。

1.2 绝缘子信息

文中选取 6 条不同线路的 9 支运行复合绝缘子进行护套与芯棒界面粘接特性研究,9 支绝缘子的详细信息见表 1。

2 护套与芯棒界面粘接性的检测方法

解剖试验和护套—芯棒压剪试验均可直接判断

表1 运行复合绝缘子信息

Table 1 Information of composite insulators in operation

绝缘子编号	电压等级/kV	电压类型	投运时间/a
A ₁	500	AC	2006
A ₂	500	AC	2006
B ₁	500	AC	2003
B ₂	500	AC	2003
C ₁	500	AC	2004
C ₂	500	AC	2004
D	500	DC	2000
E	500	DC	2004
F	500	AC	2006

注:绝缘子编号中字母相同的绝缘子为同条线路绝缘子。

护套—芯棒界面的粘接性。解剖试验通过解剖护套,根据护套与芯棒分离的难易程度与解剖试验结束后芯棒上残留硅橡胶的多少,将护套与芯棒界面的粘接性依次分为5个等级:CC₁—CC₅。其中CC₁对应界面粘接性最差的情况,护套与芯棒完全分离,CC₅对应界面粘接性最好的情况,护套与芯棒不能分离^[16]。护套—芯棒压剪试验通过检测护套与芯棒的界面粘接强度这一量化指标来判断界面粘接性。

选取A₁、B₁、C₁3支运行绝缘子,分别采用解剖试验和护套—芯棒压剪试验判断复合绝缘子护套与芯棒的界面粘接性。取样方案为:在每支绝缘子的高、中、低压端各取6只长度为30 mm的带护套芯棒试样,各端的6只试样中取3只试样做解剖试验,剩余3只试样做护套—芯棒压剪试验。在以下的试验结果中,均用L代表低压端,M代表中部,H代表高压端。

2.1 解剖试验结果

绝缘子A₁、B₁、C₁的解剖试验结果见图3。绝缘子A₁的高压端3只试样、低压端1只试样和中部1只试样用于护套—芯棒压剪试验的探索,因此无法给出结果。

由图3可以看出:

- 1)绝缘子A₁和B₁的护套与芯棒界面粘接性整体较好,C₁的护套与芯棒界面粘接性整体稍差;
- 2)绝缘子A₁的低压端和中部的界面粘接性较好;绝缘子B₁的低压端和高压端的界面粘接性较好,中部的界面粘接性较差;绝缘子C₁高压端和中部的护套与芯棒界面粘接性较好,低压端的护套与芯棒界面粘接性较差。

2.2 护套—芯棒压剪试验结果

绝缘子A₁、B₁、C₁的护套—芯棒压剪试验结果见图4。

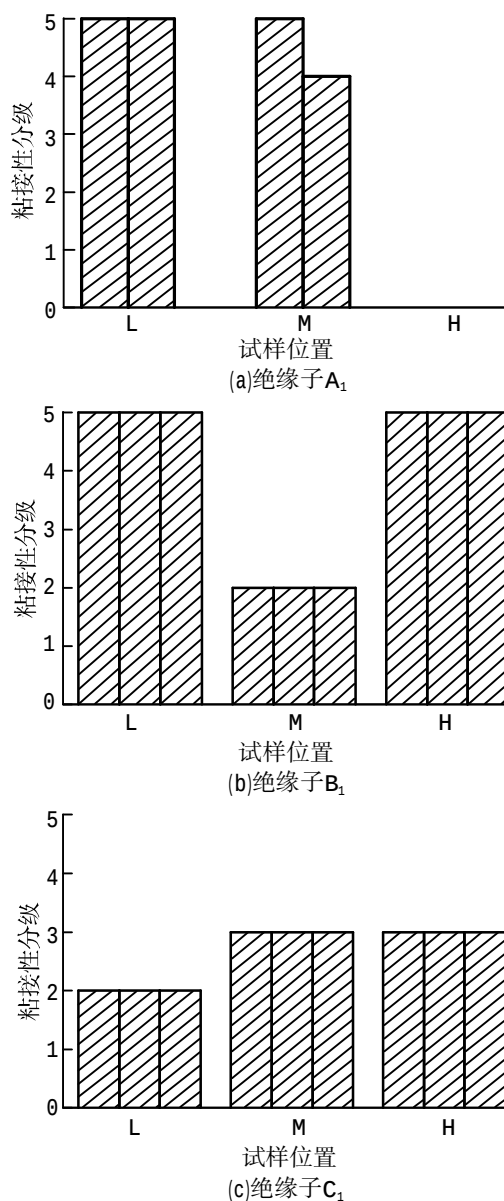


图3 解剖试验结果

Fig. 3 Results of anatomy experiment

由图4可以看出:

- 1)与绝缘子C₁相比,绝缘子A₁和B₁的护套—芯棒界面粘接性较好;
- 2)绝缘子A₁的低压端和中部护套与芯棒的界面粘接性比高压端好;绝缘子B₁的低压端和高压端护套与芯棒的界面粘接性比中部好;绝缘子C₁的中部和高压端护套与芯棒界面的粘接性比低压端稍好。

2.3 检测方法的有效性分析

对比护套—芯棒压剪试验和解剖试验的结果可以发现,绝缘子A₁的低压端、中部和B₁的低压端、高压端,在解剖试验结果中其试样的护套—芯棒界面粘接性较好,在护套—芯棒压剪试验结果中其试样的护套—芯棒界面粘接强度较高;绝缘子B₁的中部和C₁的高中低压端,在解剖试验结果中其试样的

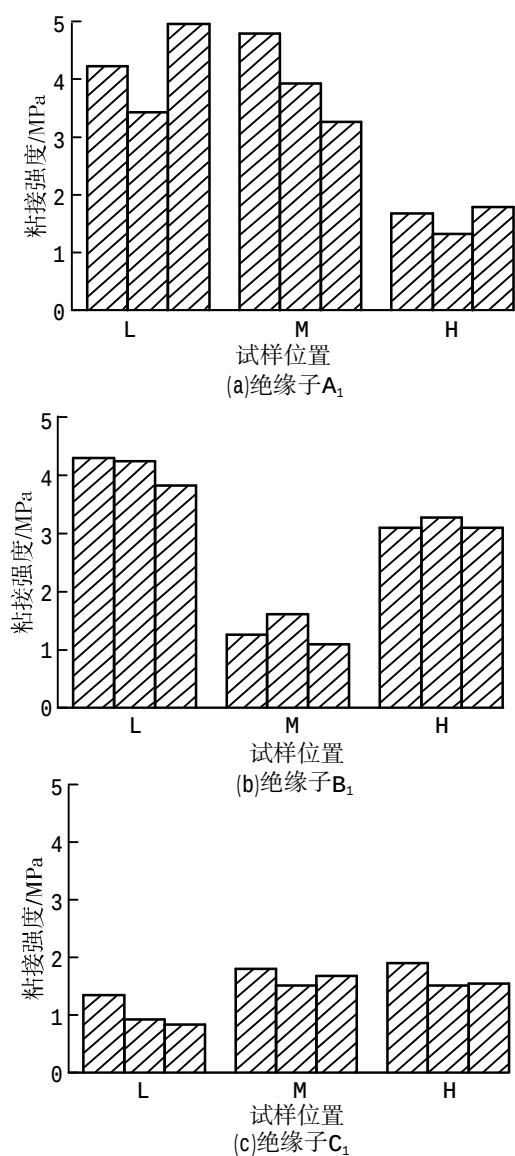


图4 护套—芯棒压剪试验结果

Fig. 4 Results of housing-core compressive shear test

护套—芯棒界面粘接性较差,在护套—芯棒压剪试验结果中其试样的护套—芯棒界面粘接强度较低。以上结果表明解剖试验与护套—芯棒压剪试验对上述3支复合绝缘子护套与芯棒界面粘接性的判断结果具有一致性,护套—芯棒压剪试验通过检测护套与芯棒的界面粘接强度可以有效判断护套与芯棒界面的粘接性。同时,与解剖试验相比,护套—芯棒压剪试验具有客观的量化指标,不受人为主观因素的影响。

解剖试验结果中试样的界面粘接性等级为 CC_1 或 CC_2 时,试样的界面粘接性判定为较差^[10],以此为根据对护套—芯棒压剪试验方法进行界面粘接性优劣的初步分级。绝缘子 B_1 的中部和绝缘子 C_1 的低压端,在解剖试验结果中其试样的界面粘接性等级均为 CC_2 ,而在护套—芯棒压剪中除了1只试样的界面粘接强度为 1.6 MPa 外,剩余5只试样的界面

粘接强度均在 1.4 MPa 以下;绝缘子 C_1 的中部、高压端,在解剖试验中其试样的界面粘接性等级均为 CC_3 ,而在护套—芯棒压剪试验中其试样的界面粘接强度均在 1.5 MPa 以上;绝缘子 A_1 的高、中部和绝缘子 B_1 的低、高压端,在解剖试验中其试样的界面粘接性等级均为 CC_4 或 CC_5 ,而在护套—芯棒压剪试验中其试样的界面粘接强度均在 3.0 MPa 以上。根据以上对比结果,将判断护套与芯棒界面粘接性优劣的临界值初步定为 1.5 MPa,即试样界面粘接强度为 1.5 MPa 以上时,判定界面粘接性好,反之则判定界面粘接性为差。

3 护套与芯棒界面质量的检测方法及分级

文[17]提出改进的水扩散试验方法,通过检测水煮后绝缘子试样护套与芯棒的界面泄漏电流,对护套与芯棒的界面缺陷进行判断,若界面泄漏电流小于 100 μA ,则说明界面缺陷较少,该试样通过改进的水扩散试验检测,反之则不能通过改进的水扩散试验检测。为了研究复合绝缘子护套与芯棒界面粘接性与界面缺陷的关系,并进而评判界面质量,文中采用改进的水扩散试验法和护套—芯棒压剪试验法对水煮后的复合绝缘子试样进行了检测。

选取 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D 、 E 、 F 6 支运行复合绝缘子,在每支绝缘子的高、中、低压端各取 6 只试样,把其中 3 只芯棒试样去掉护套,再将所有试样放入质量分数为 0.1% 的 NaCl 溶液中水煮 100 h,测试所有试样的泄漏电流值和带护套芯棒试样的界面粘接强度。

3.1 界面泄漏电流测试结果

6 支绝缘子的高、中、低压端护套与芯棒的界面泄漏电流测试结果见图 5。其中每个位置用 3 只无护套芯棒试样泄漏电流的平均值表示该位置的泄漏电流值 I_1 ,用 3 只带护套芯棒试样泄漏电流的平均值表示该位置的泄漏电流值 I_2 ,用 $(I_2 - I_1)$ 表示带护套芯棒试样的界面泄漏电流值。

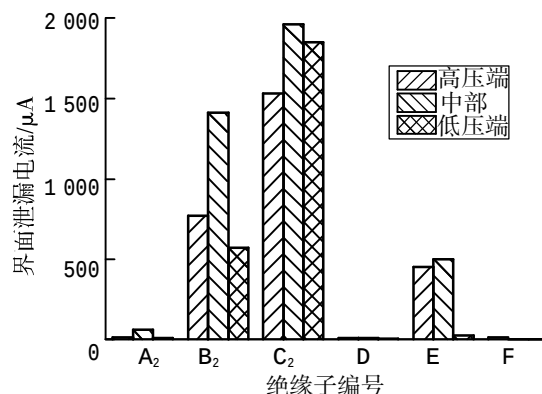


图5 界面泄漏电流测试结果

Fig. 5 Detection results of interface leakage current

由图5可以看出:

1)绝缘子 A_2 、D、F的高、中、低压端试样护套与芯棒的界面泄漏电流值均在 $60\mu A$ 以下,小于 $100\mu A$,通过了改进的水扩散试验的检测;

2)绝缘子E的高压端和中部试样护套与芯棒界面泄漏电流值均大于 $450\mu A$,不能通过改进的水扩散试验的检测,低压端泄漏电流值为 $27\mu A$,通过检测;

3)绝缘子 B_2 与 C_2 的高、中、低压端试样的泄漏电流值均在 $500\mu A$ 以上,远远大于 $100\mu A$,不能通过改进的水扩散试验的检测。

3.2 界面粘接强度测试结果

带护套芯棒试样的界面粘接强度测试结果见图6,其中每个位置用3只试样界面粘接强度平均值表示该位置的界面粘接强度。

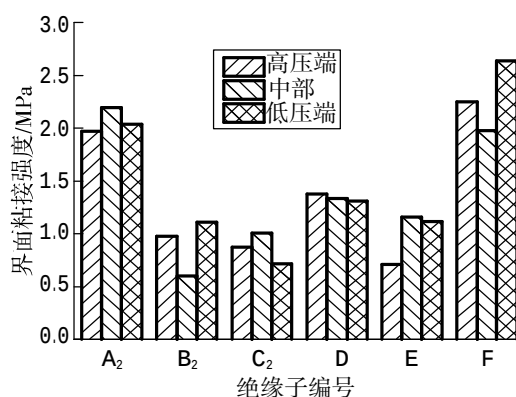


图6 界面粘接强度测试结果

Fig. 6 Detection results of interface adhesive strength
由图6可以看出:

1)绝缘子 A_2 和F的高、中、低压端试样的界面粘接强度均在 1.9 MPa 以上,大于 1.5 MPa ,表明绝缘子 A_2 和F的高、中、低压端护套与芯棒的界面粘接性均较好;

2)绝缘子 B_2 、 C_2 、D和E的高、中、低压端试样的界面粘接强度均在 1.4 MPa 以下,小于 1.5 MPa ,表明该4支绝缘子高、中、低压端护套与芯棒的界面粘接较差。

3.3 界面质量的分级

根据界面泄漏电流和界面粘接强度测试结果将绝缘子试样进行分类,分类结果见表2。试样的表示方法中,第1个字母代表绝缘子,第2个字母代表位置,例如 A_2-H 代表绝缘子 A_2 的高压端试样。

由表2的结果可以看出水煮后的绝缘子试样可分为以下3类:第1类试样的界面泄漏电流值较小,同时界面粘接强度较大;第2类试样的界面泄漏电流值较小,但界面粘接强度较小;第3类试样的界面泄漏电流值较大,同时界面粘接强度较小。

上述将绝缘子试样分为3类的结果表明,水煮

表2 绝缘子试样分类结果

Table 2 Classification of insulator samples		
试样	界面泄漏电流/ μA	界面粘接强度/ MPa
A_2-H 、 A_2-M 、 A_2-L	小于100	大于1.5
$F-H$ 、 $F-M$ 、 $F-L$	小于100	大于1.5
$D-H$ 、 $D-M$ 、 $D-L$	小于100	小于1.5
$E-L$	小于100	小于1.5
B_2-H 、 B_2-M 、 B_2-L	大于100	小于1.5
C_2-H 、 C_2-M 、 C_2-L	大于100	小于1.5
$E-M$ 、 $E-H$	大于100	小于1.5

后复合绝缘子试样的界面泄漏电流值和界面粘接强度,可以分别反映护套与芯棒界面的缺陷和粘接性,结合改进的水扩散试验方法与护套—芯棒压剪试验方法可以对护套与芯棒的界面质量进行有效检测。根据界面泄漏电流值和粘接强度对绝缘子试样护套与芯棒的界面质量进行评价,评价结果见表3。

表3 界面质量评价结果

Table 3 Interface quality evaluation			
试样	界面缺陷	界面粘接性	界面质量
A_2-H 、 A_2-M 、 A_2-L	少	好	好
$F-H$ 、 $F-M$ 、 $F-L$	少	好	好
$D-H$ 、 $D-M$ 、 $D-L$	少	差	中等
$E-L$	少	差	中等
B_2-H 、 B_2-M 、 B_2-L	多	差	差
C_2-H 、 C_2-M 、 C_2-L	多	差	差
$E-M$ 、 $E-H$	多	差	差

由表3的界面质量评价结果可以发现,3类绝缘子试样护套与芯棒的界面质量由好到差的变化过程中,界面粘接性首先由好变差,然后是界面缺陷由少变多。由此推测复合绝缘子在挂网运行过程中其护套与芯棒的界面也是按照此过程逐渐劣化:挂网的复合绝缘子运行时间较短时,其护套与芯棒的界面没有劣化,质量较好;随着运行时间的增长,界面粘接性开始逐渐变差,界面质量变为中等;随着护套与芯棒界面的进一步劣化,局部位置的界面粘接性变差到一定程度时护套与芯棒脱粘,发展成为界面缺陷,界面质量变为差。

基于护套与芯棒界面质量检测方法的研究,文中提出通过检测水煮后复合绝缘子试样的界面泄漏电流值和粘接强度对护套与芯棒的界面粘接质量进行初步分级,见表4。表4中: I 表示护套与芯棒的界面泄漏电流值; τ 表示护套与芯棒的界面粘接强度。

4 结论

1)护套—芯棒压剪试验通过检测复合绝缘子护

表 4 界面质量分级

Table 4 Interface quality classification

τ/MPa	$I < 100 \mu\text{A}$	$I > 100 \mu\text{A}$
$\tau > 1.5$	好	稍差
$\tau < 1.5$	稍差	差

套与芯棒的界面粘接强度, 可有效判断护套与芯棒的界面粘接性, 同时护套—芯棒压剪试验具有客观的量化指标, 不受人为主观因素的影响。

2) 水煮后复合绝缘子试样的界面泄漏电流和界面粘接强度, 可以分别反映界面缺陷和界面粘接性, 结合改进的水扩散试验方法与护套—芯棒压剪试验方法可以对护套与芯棒的界面质量进行有效检测。

3) 以界面泄漏电流值和界面粘接强度为评价指标, 对复合绝缘子护套与芯棒的界面质量进行初步分级。

参考文献:

- [1] 许 喆. 复合绝缘子的长期运行性能试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
XU Zhe. Experimental study of composite insulators on long-term performance[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [2] 张福增, 宋 磊, 屠幼萍, 等. 500 kV 复合绝缘子运行特性分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2536-2541.
ZHANG Fuzeng, SONG Lei, TU Youping, et al. Analysis of operating performance for 500 kV composite insulator [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2536-2541.
- [3] 杨红军, 王晓楠, 吴兆峰, 等. 复合绝缘子运行经验总结 [J]. 电网技术, 2006, 30(12): 95-97.
YANG Hongjun, WANG Xiaonan, WU Zhaofeng, et al. Comprehensive summarization of experiences in development, production, operation and test of composite insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 95-97.
- [4] 刘 洋, 王建国, 韩 芳, 等. 不同运行年限的复合绝缘子电气和机械性能[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1017-1021.
LIU Yang, WANG Jianguo, HAN Fang, et al. Electrical and mechanical properties of composite insulators after different operation periods[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1017-1021.
- [5] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 1-7.
LIU Zehong. Present situation and prospects of applying composite insulators to UHF transmission lines in China [J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 1-7.
- [6] 郭 浩. 我国复合绝缘子的应用及运行中的若干问题 [J]. 电力设备, 2006, 7(4): 43-45.
GUO Hao. Some problems in application and operation of composite insulators in China[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(4): 43-45.
- [7] 王国春, 陈 原. 京津唐电网复合绝缘子运行分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(5): 3-13.
WANG Guochun, CHEN Yuan. Composite insulator service in Beijing-Tianjin-Tangshan power network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(5): 3-13.
- [8] 谢从珍, 刘 珊, 刘 芹, 等. 交流 500 kV 复合绝缘子内部缺陷对轴向电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 922-927.
XIE Congzhen, LIU Shan, LIU Qin, et al. Internal defects influence of 500 kV AC composite insulator on the electric field distribution along the axis[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 922-927.
- [9] 滕国利, 郭元吉. 复合绝缘子界面特性[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 85-86.
TENG Guoli, GUO Yuanji. Section properties of composite insulators[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 85-86.
- [10] 郑 意, 许 飞, 李恒灿, 等. 老化复合绝缘子界面性能试验检测方法研究[J]. 广西电力, 2012, 35(2): 14-16.
ZHENG Yi, XU Fei, LI Hengcan, et al. Test method study on interface properties of aging composite insulator [J]. Guangxi Electric Power, 2012, 35(2): 14-16.
- [11] 刘晓伟, 张雪峰, 刘春翔, 等. 棒形悬式复合绝缘子内部缺陷对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2014(2): 16-20.
LIU Xiaowei, ZHANG Xuefeng, LIU Chunxiang, et al. Influence of internal defects in rod suspension composite insulator on electric field distribution[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(2): 16-20.
- [12] 秦国富. 复合绝缘子界面胶接过程的分析[J]. 电瓷避雷器, 2005(4): 12-14.
QIN Guofu. Analysis on interface adhering process of composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2005(4): 12-14.
- [13] 何子兰. 复合绝缘子人工内部缺陷的超声波检测[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HE Zilan. Ultrasonic detection of internal artificial defects in a composite insulator[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [14] 吴碧华, 冼伟雄, 陈雄一. 广州地区输电线路用复合绝缘子的运行实践[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 53-55.
WU Bihua, XIAN Weixiong, CHEN Xiongqi. Operational experience of composite insulator for overhead transmission line in Guangzhou region[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 53-55.
- [15] 李想玉, 韩晓东, 张福林, 等. 复合绝缘子芯棒与伞套界面胶粘剂选择及粘接工艺的确定[J]. 电瓷避雷器, 2012(6): 7-13.

(下转第 142 页)

- PANG Xiaogang. Analysis and processing reason of switch cabinet partial discharge[J]. Yunnan Electric Power, 2011, 39(4): 56-58.
- [10] 颜 群. 一种固体绝缘开关柜绝缘结构的设计与分析[J]. 设计与制造, 2009, 77(5): 77-80.
- YAN Qun. Design and analysis of insulation structure of solid insulation switchgear[J]. Design and Manufacture, 2009, 77(5): 77-80.
- [11] 胡明辉. 绝缘缺陷检测方法在电力电缆中的应用研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(6): 57-59.
- HU Minghui. Research on insulation fault detection method in power cable[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2015(6): 57-59.
- [12] 潘 浩, 殷庆铎, 高文胜. 固体绝缘中气隙尺寸对局部放电过程的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 458-461.
- PAN Hao, YIN Qingduo, GAO Wensheng. Influence of void dimensions on partial discharge in solid insulation [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 458-461.
- [13] 焦全平. 一种用于固体绝缘环网柜的气体间隙绝缘结构研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(6): 66-68.
- JIAO Quanping. Research on gas insulated structure for solid insulation switchgear[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2015(6): 66-68.
- [14] 张伟平, 魏东亮, 何俊达. 开关柜局部放电检测技术的应用[J]. 高压开关, 2014(4): 14-18.
- ZHANG Weiping, WEI Dongliang, HE Junda. The detecting technology of partial discharge applied on switchgear [J]. High Voltage Switchgear, 2014(4): 14-18.
- [15] 易 平, 张重乐, 梁 丽. 配电网中的固体绝缘环网柜研究[J]. 中国电业(技术版), 2014(6): 32-34.
- YI Ping, ZHANG Chongle, LIANG Li. Research on solid insulated ring main unit in power distribution grid [J]. China Electric Power(Technology Edition), 2014(6): 32-34.
- 李水胜(1979—), 男, 工程师, 研究方向为固体绝缘技术应用。
- 周振业(1975—), 男, 工程师, 研究方向为高压开关设备的结构设计。

(上接第 137 页)

- LI Xiangyu, HAN Xiaodong, ZHANG Fulin, et al. The selection of the interface between composite insulator core rod and housing and the determination of the bonding process[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(6): 7-13.
- [16] 张福增, 宋 磊, 李锐海, 等. 复合绝缘子断裂原因分析及缺陷评价方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3093-3100.
- ZHANG Fuzeng, SONG Lei, LI Ruihai, et al. Evaluation method of defect and fracture reason for composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3093-3100.
- [17] 陈 原, 刘燕生, 沈 健, 等. 复合绝缘子隐蔽性缺陷检测方法[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 58-63.
- CHEN Yuan, LIU Yansheng, SHEN Jian, et al. Inner-defect detection method for composite insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 58-63.
- [18] GB 11177—1989 无机胶粘剂套接压缩剪切强度试验方法[S]. 1989.
- GB 11177—1989 Testing method for compressive shear strength of dowel joint by inorganic adhesives[S]. 1989.
- [19] 赵建伟. 胶粘剂的粘弹性与粘接强度[J]. 橡胶译丛, 1995(3): 36-46.
- ZHAO Jianwei. Viscoelasticity and adhesive strength of adhesives[J]. Selected Translations on Rubber, 1995(3): 36-46.
- 段明明(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事高电压绝缘技术方面研究工作。
- 王 璁(1980—), 男, 讲师, 主要从事高电压绝缘技术及过电压保护研究工作。
- 屠幼萍(1966—), 女, 教授, 博导, 主要从事高电压绝缘技术、电介质介电特性及过电压保护研究工作。